

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
”Київський політехнічний інститут”

РОЗРАХУНОК ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН ПРИ СПАЛЮВАННІ ПАЛИВА

Методичні рекомендації
до виконання розрахункової роботи

Київ-2015

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
”Київський політехнічний інститут”

РОЗРАХУНОК ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН ПРИ СПАЛЮВАННІ ПАЛИВА.

Методичні рекомендації

до виконання розрахункової роботи
для студентів напрямів підготовки «Теплоенергетика»

Київ
НТУУ «КПІ»
2015

Розрахунок викидів забруднюючих речовин при спалюванні палива [Текст]: метод. рек. до викон. розрахункової роботи для студ. напрямів підготовки «Теплоенергетика» /Уклад: В.І Шкляр, В.В.Дубровська, – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 32 с.

Рекомендовано вченою радою
Інституту енергозбереження та енергоменеджменту,
НТУУ „КПІ”
(Протокол № 6 від 26 січня 2015 р.)

Навчальне електронне видання

Розрахунок викидів забруднюючих речовин при спалюванні палива

Методичні рекомендації
до виконання розрахункової роботи
для студентів напрямів підготовки «Теплоенергетика»

Укладачі: В.І. Шкляр, канд. техн. наук, доц.
В.В. Дубровська, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний
редактор В.О. Виноградов-Салтиков, канд. техн. наук, доц.

Рецензент О.В. Кофанова, д. пед. н., к.х.н., проф.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 Мета розрахункової роботи.....	5
2 Завдання на розрахункову роботу.....	5
3 Порядок виконання та оформлення завдання.....	5
4 Розрахунок викидів забруднюючих речовин.....	6
4.1 Розрахунок викидів твердих часток	6
4.2 Розрахунок викидів оксидів сірки.....	8
4.3 Розрахунок викидів оксидів вуглецю.....	8
4.4 Розрахунок викидів оксидів ванадію.....	10
4.5 Розрахунок викидів оксидів азоту від котлів.....	11
4.6 Розрахунок викидів бенз(а) пирена.....	12
4.7 Розрахунок викидів діоксиду вуглецю при спалюванні органічного палива.....	17
4.8 Розрахунок викидів важких металів.....	17
Список рекомендованої літератури.....	19
ДОДАТКИ.....	20

Вступ

Для забезпечення життєдіяльності людини необхідна енергія. Її отримують при спалюванні органічного палива, використанні сили вітру, енергії Сонця і атома. До основних видів енергії можна віднести теплову та електричну енергії. Майже половина енергії виробляється на теплових електричних станціях (ТЕС), які працюють на викопному паливі.

Виробництво централізованої теплової енергії забезпечують тепло-електроцентралі (ТЕЦ) та районні котельні (РК), які обладнані паровими чи водогрійними котельними агрегатами.

Для оцінки ефективності роботи котельних агрегатів визначають: втрати теплоти в елементах котельного агрегату, його ККД за прямим та зворотним балансами і витрату натурального та умовного палива, викиди шкідливих газів в навколишнє середовище.

1 МЕТА РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ

Мета роботи полягає в

- оволодінні методикою розрахунку викидів забруднюючих речовин при спалюванні палива з використанням обладнання для їх знешкодження;
- закріпленні теоретичних знань, отриманих при вивченні дисципліни «Екологічно чисті енерготехнології».

2 ЗАВДАННЯ НА РОЗРАХУНКОВУ РОБОТУ

В розрахунковій роботі пропонується провести розрахунок валових викидів забруднюючих речовин при спалюванні палива з використанням обладнання для їх знешкодження для заданого твердого палива та природного газу. Провести порівняння викидів забруднюючих речовин та зробити висновки.

Вихідні дані для розрахунку наведено в табл. Д1.

3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ТА ОФОРМЛЕННЯ ЗАВДАННЯ

Розрахункова робота складається з наступних розділів:

1. Розрахунок викидів забруднюючих речовин при спалюванні твердого палива.
2. Розрахунок викидів забруднюючих речовин при спалюванні природного газу.
3. Висновки по роботі.

Пояснювальна записка до розрахункової роботи повинна бути виконана на аркушах А4 і супроводжуватись відповідними рисунками та поясненнями до них.

4 РОЗРАХУНОК ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН

При розрахунках максимальних викидів шкідливих речовин, значення витрати палива (г/с) береться, виходячи з найбільшого електричного і теплового навантаження електростанції за даний період, значення зольності і сірчистості палива - за найгіршими показниками за останні три роки. Витрата рідкого і твердого палива визначається в г/с, витрата газу - в м³/с.

4.1 Розрахунок викидів твердих часток

Кількість твердих часток леткої золи і незгорілого палива $M_{ТВ}$ в тоннах в рік або в грамах в секунду, що викидається в атмосферу з димовими (відхідними) газами, обчислюють за формулою:

$$M_{ТВ} = B \frac{A^P}{100 - \Gamma_{вин}} a_{вин} (1 - \eta_3),$$

де B - витрата натурального палива за даний період, т/рік, г/с; A^P - зольність палива на робочу масу %; $a_{вин}$ - частка золи палива, що виноситься з топки відхідними газами (табл.1); η_3 - частка твердих часток, що уловлюються в золоуловлювачах (приймається за даними вимірів 0,985); $\Gamma_{ун}$ - вміст горючих у відхідних газах, %.

Таблиця 1

Частка леткої золи $a_{вин}$ при різних технологіях спалювання палива

Котел	Вугілля	Мазут
З твердим (сухим) шлаковидаленням	0,95	1,00
Відкрита топка з рідким шлаковидаленням	0,80	1,00
Напіввідкрита топка з рідким шлаковидаленням	0,70	1,00
Двокамерна топка:	0,55	1,00
з вертикальним передтопком	0,30	1,00
горизонтальна циклонна	0,15	1,00
З циркулюючим киплячим шаром	0,50	—
З бульбашковим киплячим шаром	0,20	—
З нерухомим шаром	0,15	—

За відсутності експлуатаційних даних про вміст горючих у відхідних газах кількість твердих часток, що викидаються, визначають за виразом:

$$M_{TB} = 0,01 B \left(a_{\text{вин}} A^P + q_4 \frac{Q_H^P}{32680} \right) (1 - \eta_3),$$

де: q_4 - втрати теплоти від механічної неповноти згорання палива з відхідними газами, %. Для мазутних котлів q_4 може бути прийнята рівною 0,02 %. За відсутності експлуатаційних даних q_4 при спалюванні твердого палива для наближеного розрахунку приймається нормативне значення q_4 ; Q_H^P - нижча теплота згорання палива, кДж/кг; 32680 - теплота згорання вуглецю в кДж/кг

Кількість леткої золи M_3 в тонні/рік або г/с, що входить в сумарну кількість твердих часток, які виносяться в атмосферу, обчислюють за формулою:

$$M_3 = 0,01 B A^P a_{\text{вин}} (1 - \eta_3).$$

Кількість твердих часток M_{CG} в тонні/рік або г/с, що утворюються в топці за рахунок механічного недопалу і що викидаються у вигляді коксових залишків (при спалюванні твердого палива) або у вигляді сажі (при спалюванні мазуту) розраховується за виразом:

$$M_{CG} = M_{TB} - M_3.$$

4.2 Розрахунок викидів оксидів сірки

Кількість оксидів сірки SO_2 і SO_3 в перерахунку на SO_2 в тоннах в рік або в грамах в секунду, що викидається в атмосферу з димовими газами, обчислюють за формулою:

$$M_{SO_2} = 0,02 B \cdot S^P (1 - \eta'_{SO_2}) (1 - \eta''_{SO_2}) \left(1 - \eta_{SO_2}^C \frac{n_{O_2}}{n_K} \right),$$

де S^P - вміст сірки в паливі на робочу масу %; η'_{SO_2} - частка оксидів сірки, що зв'язуються леткою золою в котлі (табл. 2); η''_{SO_2} - частка оксидів сірки, що уловлю-

ються в мокрому золоуловлювачі попутно з твердими частками (табл. 4); $\eta_{SO_2}^C$ - частка оксидів сірки, що уловлюються в установці для сіркоочищення (табл. 3); $n_{оч}$, n_K - тривалість роботи сіркоочисної установки і котла.

Таблиця 2

Ефективність зв'язування оксидів сірки золою або сорбентом у топці

Технологія спалювання	η_I	Примітка
Факельне спалювання вугілля в котлах з рідким шлаковидаленням	0,05	Зв'язування золою палива
Факельне спалювання вугілля в котлах з твердим шлаковидаленням	0,10	Те саме
Факельне спалювання мазуту в котлах	0,02	“
Спалювання в киплячому шарі	0,95	Зв'язування сорбентом у котлі при мольному відношенні $Ca/S \text{ } m = 2,5$

Таблиця 3

Ефективність та коефіцієнт роботи сіркоочисної установки.

Технологія десульфуризації димових газів	Параметри сіркоочисної установки	
	η_{II}	β
Мокре очищення – у скрубєрі з використанням вапняку (вапна) або доломіту з одержанням гіпсу	0,95	0,99
Мокре очищення – процес Веллмана - Лорда з використанням солей натрію	0,97	0,99
Мокре очищення – процес Вальтера з використанням аміачної води	0,88	0,99
Напівсухе очищення – розпилення крапель суспензії або розчину сорбенту в реакторі (технології ESOX, GSA, Niro Atomizer...)	0,90	0,99
Сухе очищення – інжекція сухого сорбенту (DSI)	0,45	0,98
Напівсухе очищення – процес LIFAC як розвиток процесу DSI з розпилом крапель води	0,80	0,98
Напівсухе очищення – процес Lurgi CFB (з використанням реактора циркулюючого киплячого шару) з розпилом крапель води	0,90	0,99
Сухе очищення – абсорбція активованим вугіллям	0,95	0,99
Каталітичне очищення від оксидів сірки і азоту (DESONOX, SNOX)	0,95	0,99

Таблиця 4

Ефективність уловлювання оксидів сірки η_{II} під час золоочищення
за допомогою мокрого скрубера

Приведений вміст сірки, %/(МДж/кг)	Лужність води на зрошення, мг-екв/дм ³		
	0	5	10
0,01	0,0250	0,1450	0,3000
0,02	0,0220	0,0850	0,1680
0,03	0,0195	0,0520	0,1010
0,04	0,0180	0,0390	0,0660
0,05	0,0175	0,0300	0,0520
0,06	0,0170	0,0260	0,0430
0,07	0,0165	0,0215	0,0350
0,08	0,0160	0,0200	0,0300
0,09	0,0155	0,0190	0,0275
0,10	0,0150	0,0180	0,0230
0,11	0,0145	0,0170	0,0205
0,12	0,0135	0,0160	0,0200
0,13	0,0130	0,0150	0,0185
0,18	0,0120	0,0120	0,0120

4.3 Розрахунок викидів оксидів вуглецю

Кількість оксидів вуглецю M_{CO} в тоннах за рік або в грамах за секунду, що викидається в атмосферу з димовими газами при спалюванні твердого, рідкого або газоподібного палива, обчислюють за формулою:

$$M_{CO} = 0,001 C_{CO} B \left(1 - \frac{q_4}{100} \right) K_P,$$

де C_{CO} - вихід оксиду вуглецю при спалюванні твердого і рідкого (кг/т) або газоподібного (кг/тис.м³) палива, визначають за формулою:

$$C_{CO} = \frac{q_3 \cdot R \cdot Q_H^P}{1013},$$

де q_3 - втрата теплоти від хімічної неповноти згорання палива, %, R - коефіцієнт, що враховує частка втрати теплоти від хімічної неповноти згорання палива,

обумовлену вмістом в димових газах окислу вуглецю: для твердого палива - 1,0; для газу - 0,5; для мазуту - 0,65.

За відсутності експлуатаційних даних q_3 і q_4 допускається приймати орієнтовно нормативні значення q_3 і q_4 .

Для газомазутних котлів, які працюють з малими надлишками повітря ($\alpha = 1,01-1,03$), слід приймати $q_3 = 0,15\%$.

K_p - режимний коефіцієнт. При визначенні річних викидів оксиду вуглецю він характеризує відношення тривалості перехідних періодів $n_{PEЖ}$, год, при яких відбувається недопал палива, до тривалості роботи котла n , год:

$$K_p = \frac{n_{PEЖ}}{n}$$

де:

$$n_{PEЖ} = m_{ПУСК} n_{ПУСК} + m_{ПЕРЕХ} n_{ПЕРЕХ}.$$

де: $m_{ПУСК}$ - кількість пусків котла в рік; $n_{ПУСК}$ - тривалість пуску котла, год; $m_{ПЕРЕХ}$ - кількість днів за рік, впродовж яких змінюється режим роботи; $n_{ПЕРЕХ}$ - тривалість перехідного режиму, год.

При визначенні максимальних викидів оксидів вуглецю $K_p = 1$.

4.4 Розрахунок викидів оксидів ванадію

Кількість оксидів ванадію в перерахунку на п'ятиокис ванадію $M_{V_2O_5}$ у тоннах в рік або в грамах в секунду, що викидаються в атмосферу з димовими газами при спалюванні рідкого палива, обчислюють за формулою:

$$M_{V_2O_5} = 10^{-6} G_{V_2O_5} B(1 - \eta_{OC}) \left(1 - \frac{1 - \eta_3}{f_v} \right),$$

де $G_{V_2O_5}$ - вміст оксидів ванадію в рідкому паливі в перерахунку на V_2O_5 , г/т; η_{OC} - коефіцієнт осідання оксидів ванадію на поверхнях нагріву котлів (табл. 5): 0,07 - для котлів з проміжними пароперегрівачами, очищення поверхонь нагріву яких проводиться в зупиненому стані; 0,05 - для котлів без проміжних пароперегрівачів за тих же умов очищення; 0 - для інших випадків; η_3 - частка твердих часток

продуктів згорання рідкого палива, уловлюваних в прибудовах для очищення газів мазутних котлів. f_v - емпіричний коефіцієнт, який враховує ефект збагачення ванадієм золи, що виходить після золоуловлювача (табл. 6).

Таблиця 5

Значення частки ванадію, яка осідає з твердими частинками на поверхнях нагріву котлів

Котел	Значення
З проміжними пароперегрівачами, очищення поверхонь яких провадиться під час зупинки	0,07
Без проміжних пароперегрівачів (за тих самих умов очищення)	0,05

Таблиця 6

Значення емпіричного коефіцієнта f_v для розрахунку ефективності уловлювання ванадію золоуловлювальною установкою

Золоуловлювальна установка	Емпіричний коефіцієнт
Електростатичний фільтр	0,6
Мокрий скруббер	0,5
Батарейний циклон	0,4

Для розрахунку ефективності очищення димових газів від мазутної золи (у перерахунку на ванадій) $\eta_{zy(v)}$ в газомазутних котлах батарейними циклонами, які спеціально застосовуються для цього, що діє в діапазоні значень ефективності пилоочищення циклону 0,65...0,85 використовують емпіричну формулу:

$$\eta_{zy(v)} = 3,1277 \cdot \eta_{zy}^2 - 1,4948 \cdot \eta_{zy} - 0,1412,$$

де η_{zy} – ефективність очищення димових газів від твердих частинок (6.1).

За відсутності результатів аналізу палива вміст оксидів ванадію $G_{V_2O_5}$ у спалюваному паливі визначається орієнтовно при $S^P > 0,4\%$:

$$G_{V_2O_5} = 95,4 S^P - 31,6,$$

де: S^P - вміст сірки в мазуті на робочу масу, %.

4.5 Розрахунок викидів оксидів азоту від котлів

Приведена нижче формула для розрахунку викидів оксидів азоту емпірична і прийнятна для енергетичних котлів паропродуктивністю більше 30 т/год і водогрійних котлів тепловою продуктивністю більше 125 ГДж/год.

Для розрахунку викидів оксидів азоту від котлів меншої потужності слід застосовувати методику **Інституту паливних копалин**.

Сумарна кількість оксидів азоту ($\text{NO} + \text{NO}_2$) в перерахунку на двоокис азоту M_{NO_x} у тоннах в рік або в грамах за секунду, що викидаються в атмосферу з димовими газами при спалюванні твердого, рідкого або газоподібного палива, розраховують за виразом:

$$M_{\text{NO}_x} = 10^{-6} k_{\text{NO}_x} Q_{\text{H}}^{\text{P}} \cdot B \cdot \beta_1 (1 - \eta_1) \left(1 - \eta_{\text{AZ}} \frac{n_{\text{AZ}}}{n_{\text{K}}} \right),$$

де k_{NO_x} - коефіцієнт, що характеризує вихід оксидів азоту без урахування заходів по скороченню викидів, г/ГДж (табл 7Д.5), β_1 - коефіцієнт, що враховує вид шлаковидалення. При рідкому шлаковидаленні - 1,4; в усіх інших випадках приймається рівним одиниці;

Таблиця 7

Показник емісії оксидів азоту без урахування первинних заходів, г/ГДж

Технологія спалювання	Тверде паливо	Мазут	Газотурбінне паливо	Природний газ
1	2	3	4	5
Факельне спалювання:				
Теплова потужність котла ≥ 300 МВт:	—	200	—	150
з рідким шлаковидаленням при спалюванні антрациту	420	—	—	—
з рідким шлаковидаленням при спалюванні кам'яного вугілля	250	—	—	—
з твердим шлаковидаленням при спалюванні кам'яного вугілля	230	—	—	—

Продовження таблиці 7

1	2	3	4	5
Теплова потужність котла < 300 МВт:		140	—	100
з рідким шлаковидаленням при спалюванні антрациту	250	—	—	—
з рідким шлаковидаленням при спалюванні кам'яного вугілля	180	—	—	—
з твердим шлаковидаленням при спалюванні кам'яного вугілля	160	—	—	—
з горизонтальною циклонною топкою для кам'яного вугілля	480	—	—	—
Циркулюючий киплячий шар	70	—	—	—
Киплячий шар під тиском	100	—	—	—
Нерухомий шар	100	—	—	—
Камера згоряння газової турбіни	—	150	150	120

η_1 – ефективність первинних (режимно-технологічних) заходів по скороченню викидів (табл. 8).

$\eta_{\text{АЗ}}$ - частка оксидів азоту, що уловлюються в азотоочисній установці (табл. 9),
 $n_{\text{АЗ}}$, $n_{\text{К}}$ - тривалість роботи азотоочисної установки і котла.

Таблиця 8

Ефективність первинних заходів η_1 скорочення викидів NO_x .

Тип первинних заходів	Ефективність η_1
Малотоксичні пальники	0,20
Ступенева подача повітря	0,30
Подача третинного повітря	0,20
Рециркуляція димових газів	0,10
Трьохступенева подача повітря та палива	0,35
Малотоксичні пальники + ступенева подача повітря	0,45
Малотоксичні пальники + подача третинного повітря	0,40
Малотоксичні пальники + рециркуляція димових газів	0,30
Ступенева подача повітря + подача третинного повітря	0,45
Ступенева подача повітря + рециркуляція димових газів	0,40
Малотоксичні пальники + ступенева подача повітря + рециркуляція димових газів	0,50
Малотоксичні пальники + ступенева подача повітря + подача третинного повітря	0,60

Ефективність та коефіцієнт роботи азотоочисної установки NO_x

Технологія очищення димових газів від NO_x	Ефективність η_{II}	Коефіцієнт роботи β
Селективне некаталітичне відновлення (СНКВ)	0,50	0,99
Селективне каталітичне відновлення (СКВ)	0,80	0,99
Активоване вугілля	0,70	0,99
DESONOX – SNOX	0,95	0,99

Примітка. Технологія DESONOX і її різновид SNOX базуються на каталітичному очищенні димових газів одночасно від оксидів сірки та азоту.

Величини діоксиду NO_2 і монооксиду NO азоту в сумарному змісті NO_x в димових газах, що викидаються в атмосферу, слід визначати за наступними формулами:

$$M_{\text{NO}_2} = 0,8M_{\text{NO}_x};$$

$$M_{\text{NO}} = (1 - 0,8)M_{\text{NO}_x} \frac{\mu_{\text{NO}}}{\mu_{\text{NO}_x}} = 0,13M_{\text{NO}_x},$$

де: $\mu_{\text{NO}}, \mu_{\text{NO}_x}$ молекулярна вага NO і NO_x ; 0,8 — коефіцієнт трансформації монооксиду азоту в діоксид.

4.6 Розрахунок викидів бенз(а)пирена

Методика визначення концентрацій бенз(а)пирена $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$ ґрунтується на результатах випробувань енергетичних котлів тепловою потужністю більше 100 МВт і отриманих емпіричних залежностях.

Кількість бенз(а)пирена, що викидається в атмосферу з димовими газами M_B в грамах в секунду або в тоннах в рік, обчислюють за формулою:

$$M_B = C_B \cdot V_G \cdot B \cdot 10^{-6},$$

де C_B - концентрація бенз(а)пирена в димових газах котла, $\text{мкг}/\text{м}^3$;

V_G - питомий об'єм димових газів, $\text{м}^3/\text{кг}$ - для рідкого і твердого палива або $\text{м}^3/\text{м}^3$ - для газоподібного палива.

При спалюванні мазуту наближене значення концентрації бенз(а)пирена в димових газах C_B^M у мікрограмах на кубічний метр, приведене до $\alpha = 1,3$, розраховують за виразом:

$$C_B^M = (25 - 0,05q_v) \cdot A \cdot 10^{-2} K_D \cdot K_\Gamma \cdot K_\sigma \cdot K_\omega \cdot K_{oc},$$

де q_v - теплова напруга топкового об'єму при номінальному навантаженні, кВт/м³. У таблиці 10 4.1 приведені значення q_v для деяких типів котлів.

Таблиця 10

Тип котла	Номінальна потужність, $D_{\text{ном}}$, т/год	Теплова напруга, q_v , кВт/м ³
ТГМ-151Б	220	230,8
ТГМ-84Б	420	205,3
ТП-85	420	164,7
ТП-87-1	420	147,3
ТГМ-96Б	480	223,9
ТГМ-104	670	219,2
БКЗ-320	320	251,4
БКЗ-420	420	215,3
ТГМ-84Б	1000	204,8

A – коефіцієнт залежить від коефіцієнта надлишку повітря за конвективним пароперегрівачем $\alpha''_{\text{пп}}$ (табл. 11). При значеннях $\alpha''_{\text{пп}} > 1,1$ концентрацію бенз(а)пирена в димових газах слід приймати рівною розрахованій при $\alpha''_{\text{пп}} = 1,10$.

Таблиця 11

$\alpha''_{\text{пп}}$	A	$\alpha''_{\text{пп}}$	A
1,005	0,8697	1,055	0,2233
1,010	0,7568	1,06	0,1956
1,015	0,6591	1,065	0,1715
1,020	0,5744	1,07	0,1504
1,025	0,5009	1,075	0,132
1,03	0,4371	1,08	0,1159
1,035	0,3817	1,085	0,1019
1,04	0,335	1,09	0,0895
1,045	0,2551	1,095	0,0788
1,05	0,2916	1,1	0,0693

K_D - коефіцієнт, що враховує вплив навантаження:

$$K_D = 1 + 25 \left(\frac{D}{D_{\text{НОМ}}} \right)$$

де D , $D_{\text{НОМ}}$ - розрахункове і номінальне навантаження котла, т/год.

Формула для K_D застосовується в інтервалі значень $D/D_{\text{НОМ}}$ від 1 до 0,5.

K_G - коефіцієнт, що враховує рециркуляцію газів, визначається за формулою:

$$K_G = 1 + ar,$$

де r - частка рециркуляції газів в інтервалі значень від 0 до 0,25; a - коефіцієнт, залежний від способу введення газів рециркуляції, рівний при поданні газів рециркуляції :

- у повітряний короб і навколо амбразур пальників - 4,0;
- у шліци під пальниками - 2,7;
- у шліци навпроти пальників - 2,0;
- у під топки - 1,0;

K_σ - коефіцієнт, що враховує вплив ступінчастого спалювання, обчислюють за формулою:

$$K_\sigma = 1 + q^\sigma,$$

де σ - частка вторинного повітря в інтервалі значень від 0 до 0,2; q - коефіцієнт, який залежить від способу організації ступінчастого спалювання : по «вертикалі» - плюс 7,0; по «горизонталі» - мінус 2,2.

K_σ - коефіцієнт, що враховує вплив введення вологи в топку в період особливо несприятливих метеорологічних умов. Визначається залежно від частки вологи по відношенню до палива, що вводиться, і способу подачі вологи (таблиці. 12).

$K_{Oч}$ - коефіцієнт, що враховує збільшення концентрації бенз(а)пирена при очищенні поверхонь нагріву працюючих парових котлів. Коли очищення не робиться, $K_{Oч}$ приймають рівним 1. У таблиці 13 приведені значення коефіцієнта $K_{Oч}$ залежно від способу очищення і періоду між очищеннями парових котлів.

Таблиця 12

Частка вологи, що вводиться по відношенню до палива, ω	Спосіб введення вологи	
	При зональному упрскуванні води в топку и подачі пари у пристінну зону топки, K_{ω}	При подачі води у дугтьове повітря, K_{ω}
0,00	1	1
0,01	0,861	0,972
0,02	0,741	0,946
0,03	0,638	0,919
0,04	0,549	0,894
0,05	0,472	0,869
0,06	0,406	0,845
0,07	0,35	0,822
0,08	0,301	0,799
0,09	0,259	0,777
0,1	0,223	0,756

Таблиця 13

Період між очищеннями, год	$K_{оч}$	
	дробоочищення конвективних поверхонь	Обдування ПН
12-24	1,2	1,1
40-48	1,5	1,25
72	2,0	1,5

При спалюванні газу наближену величину концентрації бенз(а)пирена в димових газах C_B^{Γ} у мікрограмах на кубічний метр, приведену до $\alpha = 1,3$, обчислюють за формулою:

$$C_B^{\Gamma} = 0,15C_B^M.$$

При спалюванні твердого палива наближену величину концентрації бенз(а)пирена в димових газах C_B^{TB} у мікрограмах на кубічний метр, приведену до $\alpha = 1,5$, обчислюють за формулою:

$$C_B^{TB} = 8,1 \cdot e^{-4,1\alpha_{пл}} \cdot Q_H^P \cdot (1 - \eta_B) \cdot K_{оч},$$

де Q_H^P - нижча теплота згорання палива, Мдж/кг;

η_B - частка бенз(а)пирена, яка уловлюється залежно від ефективності золоуловлювання (η_z) визначається з формули:

$$\eta_B = 0,75\eta_3'.$$

Значення $e^{-4,1\alpha_{III}''}$ в залежності від α_{II}'' наведено в таблиці 14.

Таблиця 14

α_{III}''	$e^{-4,1\alpha_{III}''}$	α_{III}''	$e^{-4,1\alpha_{III}''}$
1,010	0,011	1,035	0,004
1,015	0,009	1,04	0,0032
1,020	0,0073	1,045	0,0026
1,025	0,0059	1,05	0,0021
1,03	0,0048		

4.7 Розрахунок викидів діоксиду вуглецю при спалюванні органічного палива

Кількість діоксиду вуглецю $M_{CO_2}^{T.P.}$ у тоннах за розрахунковий період, що викидається в атмосферу з димовими газами при спалюванні твердого або рідкого палива, обчислюється за формулою:

$$M_{CO_2}^{T.P.} = 3,67 \cdot 0,01 \cdot C^P \cdot B \left(1 - \frac{q_3}{100}\right) \left(1 - \frac{q_4}{100}\right)$$

де: 3,67 - кількість діоксиду вуглецю, що утворюється при повному спалюванні 1 тонни вуглецю, тонни/тонни; C^P - вміст вуглецю в робочій масі палива %.

Кількість діоксиду вуглецю $M_{CO_2}^{\Gamma.}$ у тоннах за звітний період, що викидається в атмосферу з димовими газами при спалюванні газоподібного палива, обчислюється за формулою:

$$M_{CO_2}^{\Gamma.} = 1,964 \cdot 0,01 \left(C_{CO} + \sum m(C_{C_mH_n}) + C_{CO_2} \right) B \left(1 - \frac{q_3}{100}\right) \left(1 - \frac{q_4}{100}\right),$$

де: 1,964 - питома вага діоксиду вуглецю, т/тыс.м³; C_{CO} , $C_{C_mH_n}$, C_{CO_2} - вміст в паливі оксиду вуглецю, вуглеводнів, діоксиду вуглецю, %; B - витрата натурального палива за розрахунковий період, тис. м³/рік, і т. п.; m , n - число атомів відповідно вуглецю і водню у вуглеводнях.

4.8 Розрахунок викидів важких металів

Викид важких металів та їх з'єднань пов'язано з наявністю в мінеральній частині палива з'єднань важких металів. До важких металів, з'єднання яких найбільш шкідливі для довкілля, відносяться: арсен (As), кадмій (Cd), хром (Cr), мідь (Cu), ртуть (Hg), нікель (Ni), свинець (Pb), селен (Se), цинк (Zn). Під час спалювання мазуту або важкого дизельного палива до важких металів відносять також ванадій (V) і його з'єднання. У частках легкої золи більшість цих елементів зустрічаються у вигляді оксидів і хлоридів. У газоподібних викидах можлива наявність ртуті, селену і арсену, які частково випаровуються з палива.

Під час спалювання вугілля показник емісії важкого металу є специфічним і визначається з формули:

$$M_{BM} = c_{BM} B [\alpha_{YH} f_{OB} (1 - \eta_3) (1 - f_r) + f_r (1 - \eta_{r3})],$$

де: C_{BM} - масовий вміст важкого металу в паливі, г/кг (табл. 13), f_{OB} - коефіцієнт збагачення важкого металу (табл. 14); f_r - частина важкого металу, яка виходить в газо-подібній формі (табл. 15); η_{r3} - ефективність уловлювання газоподібної фракції важкого металу в золоуловлювачі (табл. 16).

Таблиця 13

Вміст важких металів c_{BM} у енергетичному вугіллі, мг/кг

Вугілля	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
Антрацитовий штиб АШ	20	0	47	29	0.28	26	20	0	40
Донецьке пісне ТР	20	0	47	29	0.20	26	18	0	40
Донецьке ГР	20	0	47	29	0.14	26	14	0	40
Донецьке довгополумене ДР	20	0	47	29	0.16	26	16	0	40
Львівсько-Волинське (ЛВ) ГР	20	0	47	29	0.16	26	16	0	40
Олександрійське буре Б1Р	20	0	47	29	0.16	26	14	0	40

Таблиця 14

Коефіцієнт збагачення важких металів після золоуловлювача

	Ступінь уловлення			
	$\eta \leq 0,7$	$0,7 < \eta \leq 0,97$	$0,97 < \eta \leq 0,99$	$\eta > 0,99$
Арсен (As)	1,0	$3,70 \cdot \eta - 1,59$	$175 \cdot \eta - 167,75$	5,5
Кадмій (Cd)	1,0	$7,04 \cdot \eta - 3,93$	$205 \cdot \eta - 195,55$	7,0
Хром (Cr)	1,0	1,0	1,0	1,0
Мідь (Cu)	1,0	$0,37 \cdot \eta + 0,74$	$60 \cdot \eta - 57,10$	2,3
Ртуть (Hg)	1,0	1,0	1,0	1,0
Нікель (Ni)	1,0	$1,48 \cdot \eta - 0,04$	$95 \cdot \eta - 90,75$	3,3
Свинець (Pb)	1,0	$5,56 \cdot \eta - 2,89$	$175 \cdot \eta - 167,25$	6,0
Селен (Se)	1,0	$7,78 \cdot \eta - 4,44$	$220 \cdot \eta - 210,30$	7,5
Цинк (Zn)	1,0	$7,04 \cdot \eta - 3,93$	$205 \cdot \eta - 195,55$	7,0

Таблиця 15

Частка газоподібної фракції важкого металу при спалюванні вугілля

Важкий метал	Частка газоподібної фракції
Арсен (As)	0,005
Ртуть (Hg)	0,900
Селен (Se)	0,150
Інші	0

Таблиця 16

Ефективність уловлювання газоподібної фракції важкого металу золоуловлювальною установкою під час спалювання твердого палива¹⁾

Золоуловлювальна установка	Ефективність
Електростатичний фільтр	0,35
Інші	0

Список рекомендованої літератури

1. Варламов Г.Б., Любчик Г.М., Маляренко В.А. Теплоенергетичні установки та аспекти виробництва енергії. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2003. – 232 с.
2. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. – Л.: Недра, 1988. – 312 с.
3. Родионов А.И., Клушин В.Н., Торочешников Н.С. Техника защиты окружающей среды. – М. Химия, 1989. – 512 с.

ДОДАТКИ

Додаток А Вихідні данні

Варіант	Тверде паливо -вугілля								
	Вид палива	W ^p	A ^p	S ^p	C ^p	H ^p	N ^p	O ^p	Q ^p _н
		масові %							МДж/кг
1	Антрацит	13	21,8	3	49,3	3,6	1	8,3	19,61
2	Донец. ТР	8	23	3,2	55,2	3,8	1	5,8	22,04
3	Донец. ГР	5	23,8	2,8	62,7	3,1	0,9	1,7	24,22
4	Донец. ДР	8,5	22,9	1,7	63,8	1,2	0,6	1,3	22,27
5	Л-Вол. ГР	5	20,9	2,4	66,6	2,6	1	1,5	25,27
6	Олекс. бур.	12	13,2	0,3	58,7	4,2	1,9	9,7	22,84
7	Антрацит	8,5	11	0,5	66	4,7	1,8	7,5	26,15
8	Донец. ТР	6,5	16,8	0,4	68,6	3,1	1,5	3,1	26,2
9	Донец. ГР	10	19,8	2,6	55,5	3,7	0,9	7,5	21,98
10	Донец. ДР	8	25,8	3,1	53,7	3,6	0,7	5,1	21,58
11	Л-Вол. ГР	13	21,8	3	49,3	3,6	1	8,3	19,61
12	Олекс. бур.	8	23	3,2	55,2	3,8	1	5,8	22,04
13	Антрацит	5	23,8	2,8	62,7	3,1	0,9	1,7	24,22
14	Донец. ТР	8,5	22,9	1,7	63,8	1,2	0,6	1,3	22,27
15	Донец. ГР	5	20,9	2,4	66,6	2,6	1	1,5	25,27
16	Донец. ДР	12	13,2	0,3	58,7	4,2	1,9	9,7	22,84
17	Л-Вол. ГР	8,5	11	0,5	66	4,7	1,8	7,5	26,15
18	Олекс. бур.	6,5	16,8	0,4	68,6	3,1	1,5	3,1	26,2
19	Антрацит	10	19,8	2,6	55,5	3,7	0,9	7,5	21,98
20	Донец. ТР	8	25,8	3,1	53,7	3,6	0,7	5,1	21,58
21	Донец. ГР	8,5	23	2,8	58,8	4,2	1	1,7	25,27
22	Донец. ДР	6,5	23,8	1,7	60,1	4,7	1,9	1,3	22,84
23	Л-Вол. ГР	10	22,9	2,4	58,3	3,1	1,8	1,5	26,15
24	Олекс. бур.	8	20,9	0,3	55,9	3,7	1,5	9,7	26,2
25	Олекс. бур.	13	13,2	0,5	61,3	3,6	0,9	7,5	23

Варіант	Природний газ									
	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₆	H ₂ S	N ₂	Q _c _H
	об'ємні %									МДж/м ³
1	0,06	98,89	0,12	0,01	0,01			0,01	0,9	33,08
2	0,08	98,87	0,13	0,01	0,01			0,03	0,87	33,12
3	0,14	98,24	0,29	0,2	0,09	0,04			1	33,12
4	0,08	98,65	0,16	0,08	0,01			0,02	1	33,33
5	0,1	98,94	0,25	0,04	0,02			0,05	0,6	33,12
6	0,28	94,24	3	0,89	0,39	0,17	0,13		0,9	33,24
7	1	94,08	2,8	0,73	0,3	0,07	0,02		1	34,79
8	0,32	90,29	2,8	1,1	0,75	0,34	0,2		4,2	34,21
9	0,15	96,57	1,4	0,4	0,18	0,07	0,03		1,2	34,16
10	0,01	86,43	3,9	1,72	0,87	0,3	0,07		6,7	33,83
11	0,14	98,63	0,12	0,01	0,01	0,09			1	34,04
12	0,07	94,02	0,12	0,2	0,75	0,01	0,13		4,7	33,08
13	0,09	96,48	0,13	0,08	0,18	0,02	0,02		3	34,79
14	0,15	98,35	0,29	0,01	0,01	0,39	0,2		0,6	34,21
15	0,09	98,58	0,16	0,01	0,09	0,17			0,9	34,16
16	0,11	98,36	0,25	0,2	0,01	0,07			1	33,83
17	0,29	92,07	3	0,08	0,02	0,34			4,2	34,04
18	1,01	94,49	2,8	0,04	0,39	0,07			1,2	33,33
19	0,33	88,23	2,8	0,89	0,75	0,3			6,7	33,12
20	0,16	96,47	1,4	0,73	0,18	0,03	0,03		1	34,79
21	0,02	94,23	3,9	1,1	0,01	0,07	0,07		0,6	34,21
22	0,15	98,41	0,12	0,4	0,01			0,01	0,9	34,16
23	0,08	96,97	0,12	1,72	0,09			0,02	1	33,84
24	0,1	95,52	0,13	0,01	0,01			0,03	4,2	34,04
25	0,16	96,57	0,29	1,72	0,02			0,04	1,2	33,33

Додаток А

(довідковий)

Визначення об'єму сухих димових газів

Питомий об'єм сухих димових газів, які утворюються під час повного згоряння палива, визначається на підставі даних про масовий елементний склад робочої маси палива та витрати повітря для його спалювання відповідно до стехіометричних співвідношень між паливом та повітрям. Для газоподібного палива перерахунок об'ємного вмісту його компонентів (індивідуальних газів) у масовий вміст хімічних елементів горючої маси наведено у [додатку Б](#). Формули перерахунку характеристик палива з робочої маси палива на суху та горючу (суху беззольну) і навпаки наведено у [додатку В](#). За відсутності інформації про елементний склад палива можна використовувати дані [додатка Г](#) або відповідну довідкову літературу.

Під час спалювання палива можливе його неповне згоряння, у першу чергу механічний недопал, внаслідок чого до викидів твердих частинок та шлаку потрапляють горючі речовини, головним чином вуглець.

Масовий вміст вуглецю $C^{взг}$, який згоряє, % на робочу масу, виражається через масовий вміст вуглецю в паливі C^r за формулою

$$C^{взг} = \varepsilon_C C^r,$$

(А.1)

де ε_C – ступінь окислення вуглецю палива;

C^r – масовий вміст вуглецю в паливі на робочу масу, %.

Ефективність процесу горіння визначає ступінь окислення вуглецю палива ε_C . При повному згорянні палива ступінь окислення дорівнює одиниці, але за наявності **недогорання** палива його значення зменшується. Ступінь окислення вуглецю палива ε_C в енергетичній установці розраховується за формулою

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{A^r}{C^r} \left(a_{вин} \frac{\Gamma_{вин}}{100 - \Gamma_{вин}} + (1 - a_{вин}) \frac{\Gamma_{шл}}{100 - \Gamma_{шл}} \right), \quad (A.2)$$

де A^r – масовий вміст золи в паливі на робочу масу, %;

C^r – масовий вміст вуглецю в паливі на робочу масу, %;

$a_{вин}$ – частка золи, яка видаляється у вигляді леткої золи;

$\Gamma_{вин}$ – масовий вміст горючих речовин у виносі твердих частинок, %;

$\Gamma_{шл}$ – масовий вміст горючих речовин у шлаку, %.

Для природного газу рекомендоване значення ε_C становить 0,995, для мазуту – 0,99¹⁾.

¹ Викиди парникових газів. Підприємства Міненерго України. 1990 та 1999 роки. Ініціатива з питань зміни клімату, 2000 – 62 стор.

Вміст золи A^r в паливі та горючих речовин у шлаку $\Gamma_{\text{шл}}$ і викидах твердих частинок $\Gamma_{\text{вин}}$ визначається технічним аналізом палива (ГОСТ 27313—95), а також шлаку та твердих частинок, які виходять з енергетичної установки. Частка золи $a_{\text{вин}}$, яка виноситься з енергетичної установки у вигляді леткої золи, залежить від технології спалювання палива. Вона визначається для енергетичної установки за паспортними даними та при проведенні її випробувань. За відсутності такої інформації значення $a_{\text{вин}}$ визначаються за даними таблиці Д.1 (додаток Д).

Під час спалювання 1 кг робочої маси палива з урахуванням механічного недопалювання питомий об'єм сухих димових газів $v_{\text{дг}}^0$, $\text{нм}^3/\text{кг}$ (за відсутності в них кисню) визначається за формулою¹.

$$(A.3) \quad v_{\text{дг}}^0 = 0,01(1,866C^{\text{взг}} + 0,7S^r + 0,8N^r) + v_{\text{N}_2\text{пов}},$$

де $C^{\text{взг}}$ — масовий вміст вуглецю палива, що згорів, на робочу масу, %;

S^r — масовий вміст сірки в паливі на робочу масу, %;

N^r — масовий вміст азоту в паливі на робочу масу, %;

$v_{\text{N}_2\text{пов}}$ — питомий об'єм азоту повітря, необхідного для горіння палива, $\text{нм}^3/\text{кг}$.

Питомий об'єм азоту $v_{\text{N}_2\text{пов}}$, $\text{нм}^3/\text{кг}$, в повітрі, яке необхідне для спалювання палива, визначається за формулою

$$(A.4) \quad v_{\text{N}_2\text{пов}} = 3,762v_{\text{O}_2},$$

де v_{O_2} — питомий об'єм кисню, необхідного для проходження стехіометричних реакцій окислення, $\text{нм}^3/\text{кг}$.

Питомий об'єм кисню v_{O_2} , $\text{нм}^3/\text{кг}$, необхідного для проходження стехіометричних реакцій окислення,

$$(A.5) \quad v_{\text{O}_2} = 0,01(1,866C^{\text{взг}} + 5,56H^r + 0,7S^r - 0,7O^r),$$

де $C^{\text{взг}}$ — масовий вміст вуглецю палива, що згорів, на робочу масу, %;

H^r — масовий вміст водню в паливі на робочу масу, %;

S^r — масовий вміст сірки в паливі на робочу масу, %;

O^r — масовий вміст кисню в паливі на робочу масу, %.

Константи в рівняннях (A.3) – (A.5) є стереометричними множниками.

¹ Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / Под ред. Н.В. Кузнецова, В.В. Митора, И.Е. Дубровского, Э.С. Карасиной. – М.: Энергия, 1973. – 295 с.

Густина сухих димових газів $\rho_{\text{дг}}^{\circ}$ визначається як відношення питомої маси сухих димових газів $m_{\text{дг}}^{\circ}$ до питомого об'єму сухих димових газів $v_{\text{дг}}^{\circ}$ (під час спалювання 1 кг робочої маси палива). Питома маса сухих димових газів $m_{\text{дг}}^{\circ}$ визначається за відсутності в них кисню та водяної пари, яка утворилася в результаті випарювання вологи палива та окислення водню.

Густина сухих димових газів $\rho_{\text{дг}}^{\circ}$, кг/нм³, визначається за формулою

$$(A.6) \quad \rho_{\text{дг}}^{\circ} = m_{\text{дг}}^{\circ} / v_{\text{дг}}^{\circ},$$

де $m_{\text{дг}}^{\circ}$ – питома маса сухих димових газів, кг/кг;

$v_{\text{дг}}^{\circ}$ – питомий об'єм сухих димових газів, нм³/кг.

Питома маса сухих димових газів $m_{\text{дг}}^{\circ}$, кг/кг, вираховується за формулою

$$(A.7) \quad m_{\text{дг}}^{\circ} = 0,01(3,664C^{\text{взг}} + 1,000N^r + 2,001S^r) + 4,702v_{\text{O}_2},$$

де $C^{\text{взг}}$ – масовий вміст вуглецю палива, що згоряє, на робочу масу, %;

N^r – масовий вміст азоту в паливі на робочу масу, %;

S^r – масовий вміст сірки в паливі на робочу масу, %;

v_{O_2} – питомий об'єм кисню, необхідного для проходження стехіометричних реакцій окислення, нм³/кг.

Одержане значення $v_{\text{дг}}^{\circ}$ за відсутності кисню в димових газах (коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1$) може бути приведене до стандартного вмісту кисню в димових газах, наприклад, до 6 %, за допомогою рівняння

$$v_{\text{дг}} = v_{\text{дг}}^{\circ} \frac{21}{21 - \text{O}_{2\text{ст}}} = v_{\text{дг}}^{\circ} \frac{21}{21 - 6} = 1,4v_{\text{дг}}^{\circ}, \quad (A.8)$$

де $v_{\text{дг}}$ – питомий об'єм сухих димових газів, приведений до стандартного вмісту кисню в димових газах, нм³/кг;

$v_{\text{дг}}^{\circ}$ – питомий об'єм сухих димових газів при $\text{O}_2 = 0$ %, нм³/кг;

$\text{O}_{2\text{ст}}$ – стандартний об'ємний вміст кисню в сухих димових газах, %.

Перерахунок значення вимірної концентрації в показник емісії j -ї забруднювальної речовини для конкретного джерела викиду здійснюється за формулою

$$k_j = c'_j v_{\text{дг}} / Q_i^r, \quad (A.9)$$

де k_j – показник емісії j -ї забруднювальної речовини, г/ГДж;

c'_j – виміряна масова концентрація j -ї забруднювальної речовини в сухих димових газах, приведена до нормальних умов та стандартного вмісту кисню, мг/нм³;

$V_{\text{дг}}$ – питомий об'єм сухих димових газів, приведений до стандартного вмісту кисню, $\text{нм}^3/\text{кг}$;

Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, $\text{МДж}/\text{кг}$.

Додаток Б
(довідковий)

Перерахунок характеристик газоподібного палива

Для газоподібного палива, як правило, відомі його об'ємні характеристики:

- склад – метан (CH_4), етан (C_2H_6), пропан (C_3H_8), бутан (C_4H_{10}), пентан (C_5H_{12}) та більш важкі вуглеводні, азот (N_2), сірководень (H_2S), оксид (CO) і діоксид (CO_2) вуглецю;

- теплота згоряння;

- об'ємна витрата;

- об'єм використаного палива за певний проміжок часу.

У методиці для визначення величин викидів та питомого об'єму використовуються масові характеристики палива – масовий елементний склад, масова теплота згоряння, маса використаного палива. Тому для газоподібного палива об'ємні характеристики необхідно перерахувати в масові.

Питома маса кожного індивідуального газу в сухому стані газоподібного палива визначається за формулами:

$$m_{\text{CH}_4} = 0,716 \cdot 0,01(\text{CH}_4)_v, \quad (\text{Б.1})$$

$$m_{\text{C}_2\text{H}_6} = 1,342 \cdot 0,01(\text{C}_2\text{H}_6)_v, \quad (\text{Б.2})$$

$$m_{\text{C}_3\text{H}_8} = 1,967 \cdot 0,01(\text{C}_3\text{H}_8)_v, \quad (\text{Б.3})$$

$$m_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 2,593 \cdot 0,01(\text{C}_4\text{H}_{10})_v, \quad (\text{Б.4})$$

$$m_{\text{C}_5\text{H}_{12}} = 3,219 \cdot 0,01(\text{C}_5\text{H}_{12})_v, \quad (\text{Б.5})$$

$$m_{\text{C}_6\text{H}_6} = 3,492 \cdot 0,01(\text{C}_6\text{H}_6)_v, \quad (\text{Б.6})$$

$$m_{\text{N}_2} = 1,250 \cdot 0,01(\text{N}_2)_v, \quad (\text{Б.7})$$

$$m_{\text{H}_2\text{S}} = 1,521 \cdot 0,01(\text{H}_2\text{S})_v, \quad (\text{Б.8})$$

$$m_{\text{CO}} = 1,250 \cdot 0,01(\text{CO})_v, \quad (\text{Б.9})$$

$$m_{\text{CO}_2} = 1,964 \cdot 0,01(\text{CO}_2)_v, \quad (\text{Б.10})$$

де m_i – питома маса i -го індивідуального газу в 1 нм^3 сухого палива, кг/нм^3 ;

$(i)_v$ – об'ємний вміст i -го індивідуального газу, %.

Густина сухого газоподібного палива $\rho_{\text{н}}$, кг/нм^3 , за нормальних умов визначається як сума питомих мас індивідуальних газів, що входять до складу палива,

$$\rho_i = \sum m_{\text{C}_p\text{H}_q} + m_{\text{N}_2} + m_{\text{H}_2\text{S}} + m_{\text{CO}} + m_{\text{CO}_2}, \quad (\text{Б.11})$$

де m_i – питома маса i -го індивідуального газу в 1 нм^3 сухого палива за нормальних умов, кг/нм^3 ;

$m_{\text{C}_p\text{H}_q}$ – питома маса вуглеводню C_pH_q , який складається з p атомів вуглецю та q атомів водню при нормальних умовах, кг/нм^3 .

Масовий елементний склад сухого газоподібного палива визначається за формулами:

$$C^{daf} = \frac{100}{\rho_H} \left(\sum \frac{12p}{12p+q} m_{CpHq} + 0,429m_{CO} + 0,273m_{CO_2} \right), \quad (Б.12)$$

$$H^{daf} = \frac{100}{\rho_H} \left(\sum \frac{q}{12p+q} m_{CpHq} + 0,059m_{H_2S} \right), \quad (Б.13)$$

$$N^{daf} = \frac{100}{\rho_H} m_{N_2}, \quad (Б.14)$$

$$S^{daf} = \frac{100}{\rho_H} (0,941m_{H_2S}), \quad (Б.15)$$

$$O^{daf} = \frac{100}{\rho_H} (0,571m_{CO} + 0,727m_{CO_2}), \quad (Б.16)$$

де C^{daf} – масовий вміст вуглецю в паливі на горючу масу, %;

H^{daf} – масовий вміст водню в паливі на горючу масу, %;

N^{daf} – масовий вміст азоту в паливі на горючу масу, %;

S^{daf} – масовий вміст сірки в паливі на горючу масу, %;

O^{daf} – масовий вміст кисню в паливі на горючу масу, %;

ρ_H – густина сухого газоподібного палива при нормальних умовах, кг/нм³;

m_i – питома маса i -го індивідуального газу в 1 нм³ сухого газоподібного палива, кг/нм³.

Для перерахунку об'ємної витрати газоподібного палива в масову використовують формулу

$$b = b_v \rho_i, \quad (Б.17)$$

де b – масова витрата газоподібного палива, кг/с;

b_v – об'ємна витрата газоподібного палива при нормальних умовах, нм³/с;

ρ_H – густина газоподібного палива при нормальних умовах, кг/нм³.

Маса використаного газоподібного палива B , т, за проміжок часу P та масова теплота згоряння розраховуються за формулами:

$$B = B_v \rho_i, \quad (Б.18)$$

$$Q_H^P = Q_{HG}^C / \rho_i, \quad (Б.19)$$

де B_v – об'єм використаного газоподібного палива за проміжок часу P при нормальних умовах, тис. нм³;

Q_H^P – масова нижча теплота згоряння газоподібного палива, МДж/кг;

Q_{HG}^C – об'ємна нижча теплота згоряння газоподібного палива при нормальних умовах, МДж/нм³.